

在离心式压缩机中用干封替代湿封

REPLACING WET SEALS WITH DRY SEALS IN CENTRIFUGAL COMPRESSORS

1 内容提要

离心式压缩机广泛用于天然气开采和输送过程中。旋转轴上的密封阻止高压天然气从压缩机机箱中逸出。这些密封通常使用高压密封油来阻止气体逸出。天然气 STAR 合作伙伴发现，用干封替代“湿”（油）封能极大地降低经营成本和甲烷排放量。

湿封的甲烷排放量一般在 40~200 标准立方英尺/分钟。当密封油在高压密封面处将其吸收的气体分离出来时会发生甲烷排放，其排放量占总排放量的大部分。干封使用高压气来密封压缩机，这种方式的甲烷逸出量少（最高为 6 标准立方英尺/分钟），功率要求较低，能提高压缩机和管线的运行效率和性能，增强压缩机可靠性，并且维护工作量少。

尽管因为壳体设计或操作要求等原因使得在某些压缩机上不可能采用干封，但是当合作伙伴更换或安装离心式压缩机时，应尽量采用干封而不采用湿封。干封每年可节省 135 000 美元的费用，在不到 14 个月的时间内就可以收回投资。例如，一个天然气 STAR 合作伙伴在现有压缩机上安装干封系统后，甲烷排放量减少了 97%，从 75 千立方英尺/天减少到 2 千立方英尺/天，仅气体一项每年就可以节省近 80 000 美元。

排放源	年气体损失体积 (千立方英尺)	减少气体损失 的方法	节省气体的价值 (美元/年)	实施费用 (美元/年)	投资回收期
湿（油）封	45 120 ¹	安装干封系统	240 000	135 360 ²	14 个月 ³

¹以年运行时间为 8 000 小时的“杆式”压缩机的湿封和干封排放速度（如，100 标准立方英尺/分钟与 6 标准立方英尺/分钟比较）之差为基础所计算的结果。
²气体价格按 3 美元/千立方英尺计算。
³更换一个完全起作用的湿封，可额外减少 73 000 美元操作维护费用，以此为基础计算投资回收期。

2 技术背景

2.1 湿封

离心式压缩机要求围绕旋转轴周围进行密封，以阻止气体从旋转轴穿过压缩机机箱逸出到大气中。普通的“杆式”压缩机有两处密封，压缩机两端各有一处；而“悬挂”式压缩机仅在“内侧”（马达）面有一处密封。如图 1 所示，这些密封处使用密封油形成一个防止压缩气泄漏的屏障，密封油在高压下循环于压缩机轴周围的三个密封环之间。中间的密封环附在转动轴上，位于两端的另外两个密封环则固定在密封壳体上，迫使油膜在密封环之间流动，起润滑和阻止泄漏的作用。“O 型圈”橡胶密封阻止固定环周围发生泄漏。通过油膜屏障逸出的气体非常少，相当多的气体在“内侧”（压缩机侧）密封油/气接触面处在高压下被密封油吸收，进而污染密封油。密封油通过净化除去所吸收的气体（使用加热、闪蒸和除气技术）并重新循环使用。回收的甲烷一般排入大气中。

2.2 干封

机械干封系统是常规湿（油）封的一种替代方案。这种密封系统不使用任何循环密封油。干封在水动力槽和静压产生的反向作用力下机械地进行工作。

如图 2a 和图 2b 所示，水动力槽蚀刻在固定于压缩机轴上的旋转密封环表面上。当压缩机不转动时，弹簧使密封壳体上的固定环压在旋转密封环上。当压缩机轴高速转动时，压缩气仅有一条沿轴泄漏的通道，该通道位于旋转密封环和固定密封环之间。气体通过旋转密封环中的水力槽在密封环之间被不断增压。

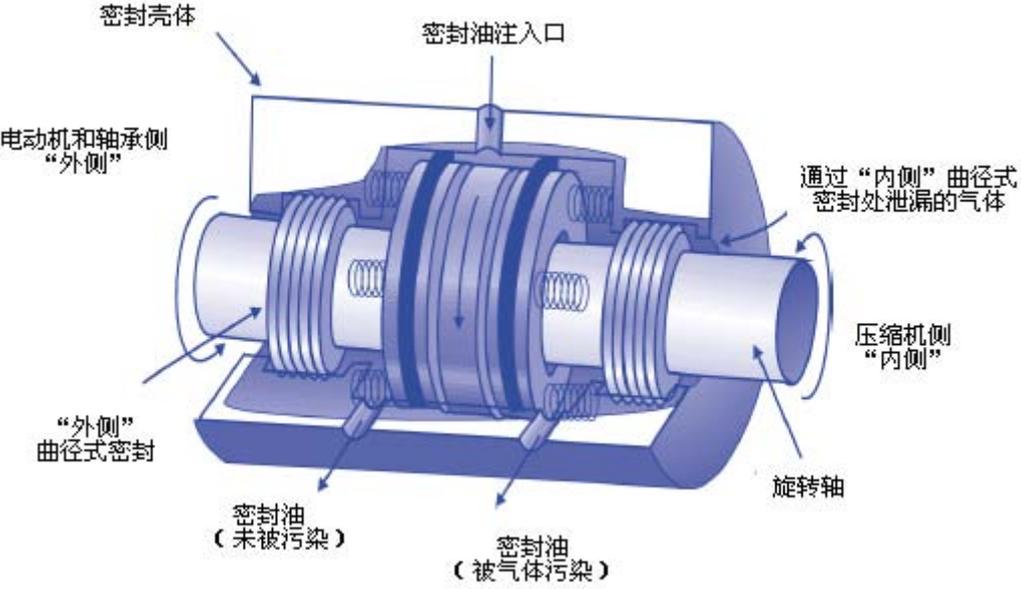


图 1 湿封示意图

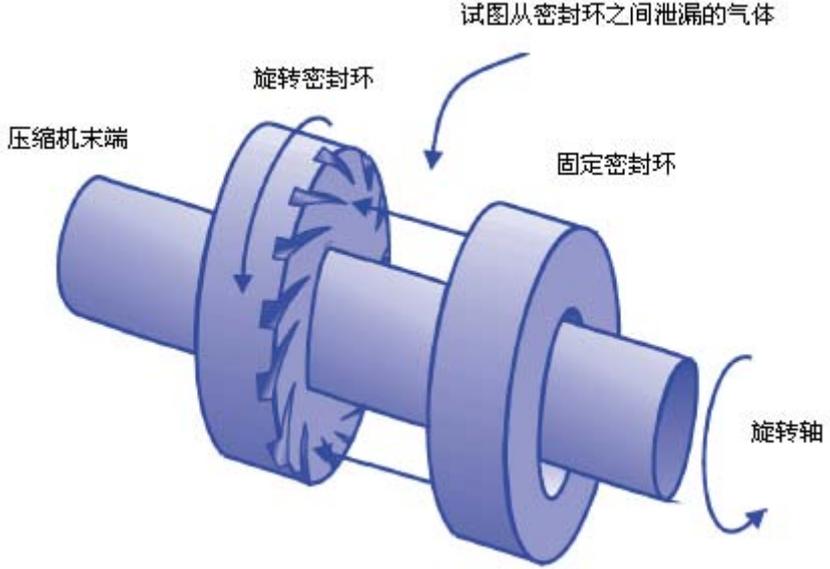


图 2a 干封示意图

密封环和弹簧之间的高压气体所产生的反作用力试图将密封环挤压在一起，并在密封环之间产生一个非常小的间隙，很少有气体能通过该间隙泄漏出去。当压缩机运转时，密封环之间并不相互接触，因此不会发生磨损，也不需要润滑。密封箱中使用 O 型圈密封固定密封环。

将两个或多个这样的干封系统连接在一起（如图 2b 所示）称作“串联式干封”，这种做法在减少气体泄漏方面非常有效。该类密封系统的泄漏量不到湿封系统泄漏量的百分之一，并且操作费用

相当低。

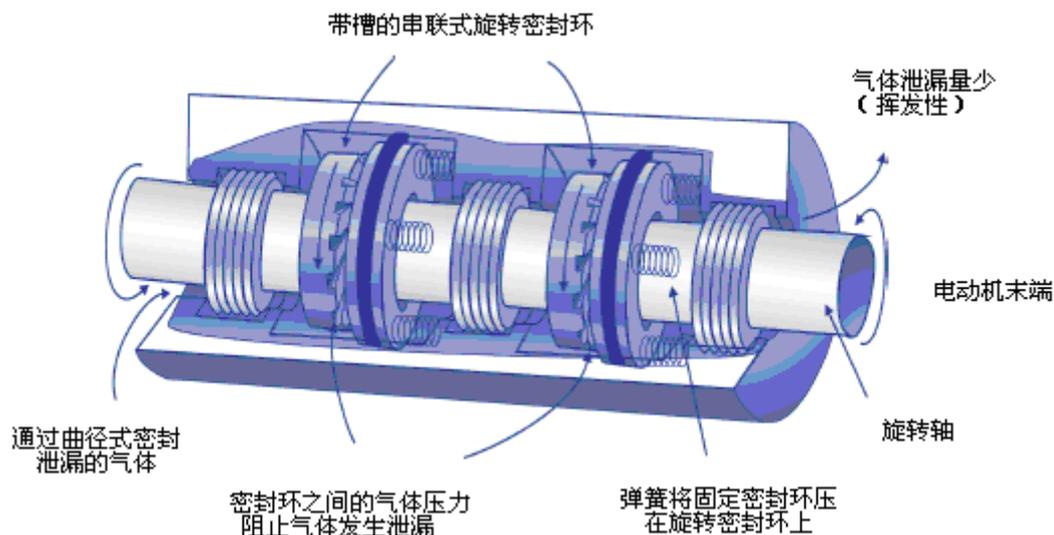


图 2b 干封示意图

3 经济和环境效益

干封能显著地降低甲烷排放量。同时，还可大大降低操作费用、提高压缩机效率。干封的经济和环境效益包括：

- ★ **降低气体泄漏速率。**在正常工作过程中，干封通过密封环的泄漏速度取决于密封尺寸和工作压力，一半在 0.5~3 标准立方英尺/分钟范围内。虽然这个泄漏速度与湿封在密封面上的泄漏速度相等，但湿封会在循环密封油的脱气过程中产生额外的气体排放。密封油中脱出的气体通常排放到大气中，对双重湿封来讲，其总的泄漏速度取决于压缩机尺寸和工作压力，一半在 40~200 标准立方英尺/分钟范围内。
- ★ **机械设备更简单。**干封系统不需要复杂的密封油循环部件和处理设备。
- ★ **降低能量消耗。**因为干封没有辅助的密封油循环泵和循环系统，所以避免了“寄生”设备的能量损失。湿式系统能耗每小时为 50~100kW，而干封系统大约每小时为 5kW。
- ★ **提高可靠性。**对于湿封压缩机，其停工时间大多是由密封系统问题引起的。干封的附属部件较少，整体可靠性较高，并且压缩机停工时间少。
- ★ **降低维护费用。**因为干封系统没有与密封油循环相关的运动部件（如泵、控制阀、减压阀），所以干封系统的维护费用低于湿封系统。
- ★ **消除湿封的密封油泄漏问题。**干封代替湿封可消除密封油泄漏进入管线的问题，进而避免气体污染和管线老化。

4 决策步骤

当考虑安装干封时，合作伙伴通常面临以下三种情况之一：更换整个压缩机；更换现有压缩机中磨损的湿封；更换现有压缩机上完全起密封作用的湿封。大约 90% 的新压缩机都带干封系统。当购买一台新压缩机时，合作伙伴应确定该压缩机是否包括干封系统。

在对更换现有压缩机上的湿封系统进行分析时，应该考虑甲烷排放节省费用以及投资和运营成本与效益。更换湿封的经济效益是引人注目的，合作伙伴应尽可能进行这样的替换。下述步骤是干封替换湿封过程中确定候选对象、经济效益和投资成本的技术指南。

第 1 步：确定湿封替换的候选对象。 操作人员需要对现有压缩机进行一个综合的库存调查和技术评估。考虑的因素包括压缩机型号、使用年限、硬件情况和操作条件。通过调查和评估，应该确定出所有湿封压缩机并对更换成干封压缩机的可行性进行评估。当确定某些压缩机为湿封更换的候选对象时，考虑如下：

湿封替换成干封的四个步骤：

- (1) 确定湿封替换的候选对象。
- (2) 估计干封改型的节省量。
- (3) 确定改成干封的费用。
- (4) 对比成本和节省量。

★ 干封能安全地用于压力高达 3 000psi 的压缩机中，常规使用压力是 1 500psi。在更高压力下，干封可能不安全。并且干封不适合在温度高于 300~400°F（由于 O 型密封圈材料限制）的环境中应用。一些压缩机结构禁止使用干封改型装置。

★ 某些使用较久的压缩机可能处于其经济寿命期末，因此适合作为设备整体更换的候选对象，而不是仅替换密封系统。在制定大型维修计划过程中，当旧压缩机的操作维护（O&M）费用远大于新设备的操作维护（O&M）费用时，通常就能确定出这个更换方案。这个阶段可能出现的一些现象，包括不定期维修的频率和次数突然增加、缺少替换元件或缺乏技术支持。

满足第 1 步标准的离心式压缩机需要进一步做如下的评估。

第 2 步：估计干封改型的节省量。 一般地，干封代替湿封所带来的大部分节省量要归因于减少了甲烷损失。为估计节省情况，合作伙伴可通过装袋技术或利用大容量采样器在密封油脱气设备的排气口处测量湿封压缩机的甲烷损失量。一些气体可能从密封面处逃逸，但是这部分气体很难测量并且其排放量还不到密封油脱气单元排放量的 10%。对于“杆式”压缩机，典型的湿封气体泄漏速度在 40~200 标准立方英尺/分钟范围内。

通过对比，在图 3 中能看出干封的预计损失量，该图是一个干封系统供货商所提供的设备性能图表。图中给出了一类串联密封系统的例子，泄漏速率在 0.5~3 标准立方英尺/分钟之间、压缩机轴直径在 1.5~10 英寸之间、压缩机工作压力在 580~1 300psig 之间。用两个串联干封替代湿封可以减少 34~194 标准立方英尺/分钟的排放量。这等价于每年工作 8 000 小时的压缩机可节省甲烷 16 320~93 120 千立方英尺，每年总共可节省 48 960~279 360 美元。

这个方法适用于所有压缩机。常见的悬挂式压缩机具有一个单一密封，湿封转换成干封的气体节省量是杆式压缩机进行同样转换的气体节省量的一半。

除了节省气体以外，与湿封相比，干封还可大大地节省操作维护费用。干封的年操作维护费用变化范围很大，在 6 000~10 000 美元/年之间。湿封的操作维护费用高达 100 000 美元/年。干封和湿封操作维护费用的详细计算有案可稽（Uptigrove 等人，1987）。表 4 总结了轴直径为 7.5 英寸、每年运行 8 000 小时的压缩机的估算结果。

计算中所使用的现场具体因素包括：（1）湿封和干封的阻力损失；（2）密封油泵和冷却扇的功率；（3）压缩机功率；（4）密封油消耗量；（5）年度紧急和定期维护费用。

第 3 步：确定改成干封的费用。 干封系统的费用取决于压缩机工作压力、轴尺寸、旋转速度以及其他具体安装因素。湿封系统每英寸轴直径的密封费用一般在 5 000~6 000 美元之间，串联干封系统每英寸轴直径的密封费用在 8 000~10 000 美元之间。对于杆式压缩机（两个密封），其费用将加倍。

其他费用包括工程技术费用、安装费用和辅助设备费用。干封系统需要气体控制台、过滤装置、控制器和监控设备；而湿封系统需要密封油泵、风扇冷却器、脱气装置和控制器。根据安装位置、设备型号、控制器数量和可用性部件的不同，干封系统的费用在 30 000~100 000 美元范围内，而湿封系统的费用则高达 200 000 美元。对于单封类型的压缩机和双封类型的压缩机，其辅助设施费用都是一样的。

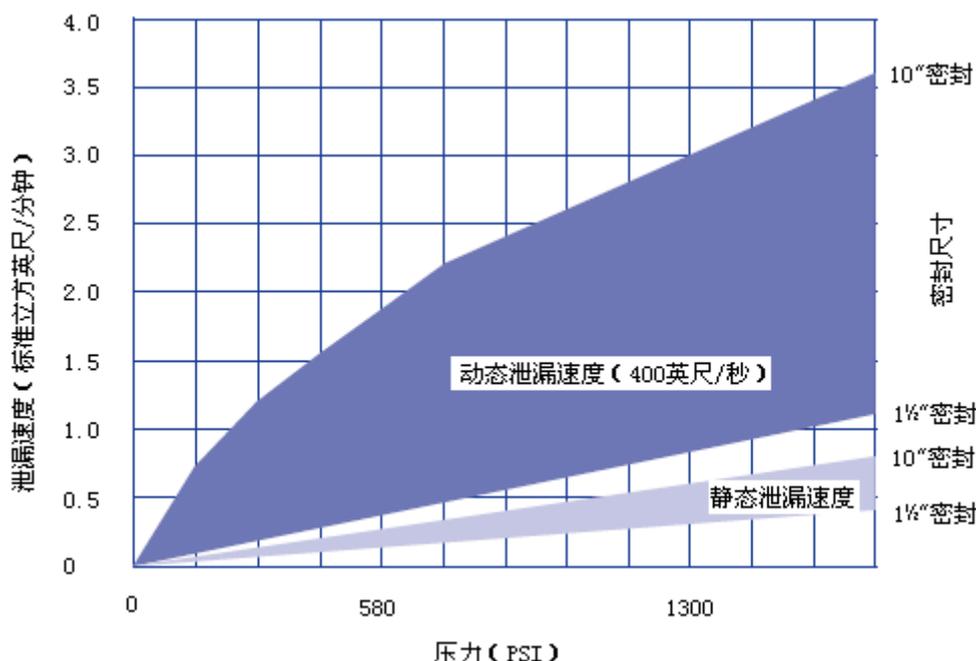


图 3 干封性能图表

(注意：该图是硬密封面—硬密封面的结果，仅供参考。设备性能特性会因设备类型和使用情况的不同而变化。来源：BW/IP 国际公司密封部门。Durco 国际公司和 BW/IP 国际公司目前被称作 FLOWSERVE 公司。)

表 4 每台干封压缩机每年节省的操作维护费用¹

(1) 降低密封功率损耗=13 900 美元
(2) 减少油泵/风扇功率损耗=4 000 美元
(3) 提高管线流动效率=26 600 美元
(4) 减少密封油损失=3 500 美元
(5) 减少操作维护费用、停工时间=15 000 美元
总计节省=63 000 美元
¹ S.O. Uptigrove 等。

第 4 步：对比成本和节省量。对压缩机湿封转换成干封和用新部件替换现有湿封这两种方案进行简单的费用对比，结果表明在 5 年时间内会节省大量费用。表 5 给出了一个轴直径为 6 英寸、年工作 8 000 小时的杆式压缩机的例子，所用费用来自第 2 步和第 3 步。

在本例中，将压缩机湿封转换成干封的实施费用包括密封和干气调节费用、监控费用和控制台费用。对于湿封系统，密封油循环、脱气和冷却等辅助设备可重复使用，因此实施费用仅包括密封更换费用。

5 估计节省量

通过一张 5 年期现金流量表可从另一个角度来说明这种做法的经济性。这种分析方法考虑了投资成本、甲烷排放节省费用、操作维护费用，并为湿封系统指定了一个残值。值得注意的是，所有分析与具体现场情况高度相关，但干封改型系统的经济效益具有非常大的吸引力，因此不管设备使用年限如何，各公司都应考虑更换掉所有湿封系统。表 6A 给出了用干封系统更换一个完全起作用的湿封系统的经济效益分析结果。

表 5 6 英寸杆式压缩机更换密封的费用对比

费用类别	干封 (美元)	湿封 (美元)
实施费用¹		
密封费用 (2 个干封@10 000 美元/英寸轴, 带测试)	120 000	
密封费用 (2 个湿封@5 000 美元/英寸轴)		60 000
其他费用 (工程技术费用、设备安装费用)	120 000	0 ²
总的实施费用	240 000	60 000
年操作维护费用 ³	10 000	73 000
年甲烷排放量 ⁴ (@3 美元/千立方英尺; 8 000 小时/年)		
2 个干封, 排放速度为 6 标准立方英尺/分钟	8 640	
2 个湿封, 排放速度为 100 标准立方英尺/分钟		144 000
5 年期内总费用 (美元):	333 200	1 145 000
5 年期内干封节省的总费用:		
节省 (美元)	818 000	
甲烷减排量 (千立方英尺) (45 120 千立方英尺/年)	225 600	
¹ Flowsolve 公司。 ² 重复使用现有的密封油循环、脱气和控制设备。 ³ 来自表 4; 假设 7.5 英寸轴的操作维护费用相同。 ⁴ 以典型的排气速度为基础。		

表 6A 用新的干封系统更换完全起作用的湿封系统的经济效益

将轴直径为 6 英寸、年运行时间为 8 000 小时、完全起作用的湿封压缩机改型为干封压缩机						
费用和节省 (美元)	第 0 年	第 1 年	第 2 年	第 3 年	第 4 年	第 5 年
干封投资和安装费用	(240 000)					
年甲烷排放节省费用 ¹		135 360	135 360	135 360	135 360	135 360
干封年操作维护费用		(10 000)	(10 000)	(10 000)	(10 000)	(10 000)
湿封残值	20 000					
可避免的湿封费操作维护用		73 000	73 000	73 000	73 000	73 000
年度总计	(220 000)	198 360				
NPV (净现值)²=531 940 美元 IRR (内部收益率) =86% 投资回收期³=14 个月						
¹ 年节省费用等于新的干封系统与更换的湿封系统之间的甲烷损失差值与气体价格 (3 美元/千立方英尺) 的乘积。 ² 以计算周期取 5 年、贴现率取 10%来计算净现值。 ³ 湿封泄漏速度在 200~40 标准立方英尺/分钟之间, 其对应的投资回收期在 8~24 个月之间。						

表 6B 给出了替换一个接近使用寿命末期的旧湿封系统的经济效益分析结果: 残值为 0 并且湿封

的年操作维护费用增加（本例中为 100 000 美元/年）。这两个例子说明，不管湿封系统的使用年限和工作条件如何，用干封替换湿封都是经济有效的。

表 6B 用新的干封系统更换到达使用寿命期末的旧湿封系统的经济效益

将轴直径为 6 英寸、年运行时间为 8000 小时、正需要更换湿封的压缩机改型为干封压缩机						
费用和节省 (美元)	第 0 年	第 1 年	第 2 年	第 3 年	第 4 年	第 5 年
干封投资和安装费用	(240 000)					
年甲烷排放节省费用 ¹		135 360	135 360	135 360	135 360	135 360
干封年操作维护费用		(10 000)	(10 000)	(10 000)	(10 000)	(10 000)
湿封残值	0					
可避免的湿封费操作维护用		10 000	10 000	10 000	10 000	10 000
年度总计	(240 000)	225 360				
NPV (净现值) ² =614 292 美元						
IRR (内部收益率) =90%						
投资回收期 ³ =13 个月						
¹ 年节省费用等于新的干封系统与更换的湿封系统之间的甲烷损失差值与气体价格 (3 美元/千立方英尺) 的乘积。						
² 以计算周期取 5 年、贴现率取 10% 来计算净现值。						
³ 湿封泄漏速度在 200~40 标准立方英尺/分钟之间，其对应的投资回收期在 8~24 个月之间。						

6 经验总结

通过将湿封系统转换成干封系统，合作伙伴可以显著地节省成本和减少排放量。合作伙伴提供了以下的经验：

- ★ 因为干封技术不需要高压密封油系统，所以与湿封技术相比，干封技术操作起来更安全。
- ★ 为了最有效地将湿封转换成干封，应将转换工作规划在停工期间实施以避免中断系统运行。
- ★ 当确定更换密封的经济效益时，合作伙伴应考虑到，正确安装和维护的干封系统，其使用寿命将是湿封系统使用寿命的两倍以上。
- ★ 如果湿封接近于它的使用寿命末期，新密封系统之间的简单费用分析更倾向于选择干封系统。即使现有的湿封系统仍有很长的剩余使用寿命，但干封的工作特性将显著地节省费用，因此早期更换湿封证明是合理的。
- ★ 考虑到干封系统的明显的经济效益，因此只要技术上可行就应安装干封系统。
- ★ 目前 90% 的新压缩机都采用干封系统。干封应成为所有新压缩机的技术选择。
- ★ 将用干封替换湿封后的甲烷减排量记录在所提交的年度报告中。

7 参考文献

Canadian Association of Petroleum Producers. Options for Reducing Methane and VOC Emissions from Upstream Oil and Gas Operations. December 1993.

Henderson, Carolyn. U.S. EPA Natural Gas STAR Program. Personal contact.

Hesje, R.C. and R.A. Peterson. Mechanical Dry Seal Applied to Pipeline (Natural Gas) Centrifugal Compressors. American Society of Mechanical Engineering. Gas Turbine Conference and Exhibition. June 1984.

Kennedy, J.L. Oil and Gas Pipeline Fundamentals, Second Edition. PennWell Books. 1993.

Klosek, Marty. Flowserve Corporation. Bridgeport, New Jersey. Personal contact.

Ronsky, N. Daryl; Harris, T.A. ; Conquergood, C. Peter; and Davies, I. An Effective System for Sealing Toxic Gases in Centrifugal Compressors. American Society of Mechanical Engineers Gas Turbine Conference and Exhibition. June 1987.

Sears, John. Personal contact.

Stahley, John. Dresser-Rand Company. Olean, New York. Personal contact.

Tingley, Kevin. U.S. EPA Natural Gas STAR Program. Personal contact.

Uptigrove, S.O. ; Harris, T.A. ; and Holzner, D.O. Economic Justification of Magnetic Bearings and Mechanical Dry Seals for Centrifugal Compressors. American Society of Mechanical Engineers Gas Turbine Conference and Exhibition. June 1987.